



Моделирование микровзрывного распада двухжидкостных капель¹

Антонов Д.В.* , Зубрилин И.А.** , Сажин С.С.***,**** , Скрипов П.В.***** , Стрижак П.А.* , Яновский Л.С.*****

*Томский политехнический университет, Томск

**Самарский национальный исследовательский университет, Самара

***Университет Брайтон, Брайтон, Великобритания

****Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

*****Институт теплофизики Уральского отделения РАН, Екатеринбург

*****Центральный институт авиационного моторостроения, Москва

В работе приведены результаты исследования процессов микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель типичных для различных энергетических и топливных технологий жидкостей.

Экспериментальная методика

Для исследования процессов микро-взрывной фрагментации составных многокомпонентных капель использовались типичные для различных энергетических и топливных технологий жидкости: керосин (Jet A-1), дистиллированная вода (ГОСТ 6709-72). Объемная концентрация компонентов при проведении экспериментов составляла 90 об. % керосина и 10 об. % дистиллированная вода. Выбор компонентов состава, а также их концен-

траций обусловлен тем, что в предыдущих исследованиях [1] для данной топливной композиции зарегистрированы условия устойчивой реализации процессов микровзрыва и паффинга в широком диапазоне температур (450...850 К) и размеров капель (0.5...1.5 мм). Методика генерации составных капель вода/керосин аналогична использованной в [2]. На Рис. 1 показаны типичные видеокдры нагрева, испарения и распада составных капель вода/керосин.

Для исследования время паффинга композитных капель воды/керосина применялся экспериментальный стенд, аналогичный представленному в [3]. При проведении экспериментов регистрировалось время задержки начала распада составных многокомпонентных капель. Систематические погрешности определения времени паффинга не превышали ± 1 мкс. Случайные погрешности определялись в виде доверительных интервалов по формуле $\Delta = t(\alpha_c, n) \cdot S$, где $t(\alpha_c, n)$ — коэффициент Стьюдента, зависящий от числа n (число измерений) и

¹Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (Грант № 23-69-10006, <https://rscf.ru/project/23-69-10006>).

© Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН
© Институт проблем механики им А.Ю. Ишлинского РАН
© Антонов Дмитрий Владимирович, dva14@tpu.ru
© Зубрилин Иван Александрович, zubrilin.ia@ssau.ru
© Сажин Сергей Степанович, S.Sazhin@brighton.ac.uk
© Скрипов Павел Владимирович, pavel-skrupov@bk.ru
© Стрижак Павел Александрович, pavelspa@tpu.ru
© Яновский Леонид Самойлович, yanovskiy@ciam.ru

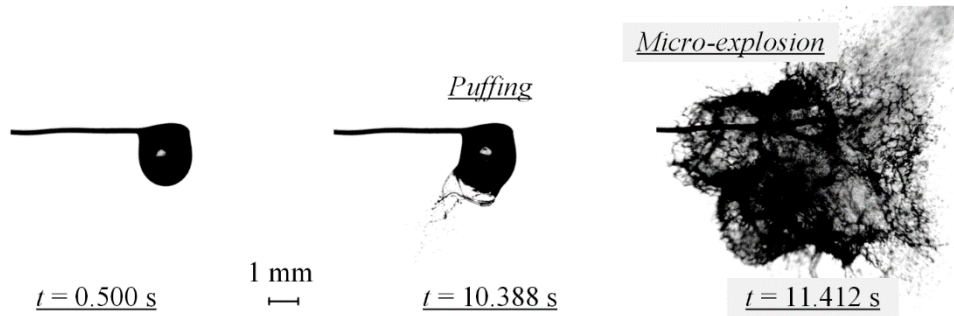


Рис. 1. Типичная динамика паффинга/микровзрыва в экспериментах. Капля композита керосин/вода с начальным радиусом $R_{d0} \approx 1$ мм и объемной долей воды $V_{w0} \approx 10$ об. % помещалась в муфельную печь с атмосферным давлением, температура $T_g \approx 573$ К

выбранной величины доверительной вероятности α_c (принималось 0.95), S — среднеквадратичное отклонение. Для всех экспериментальных точек, представленных на зависимостях в настоящей работе, проводилось не менее 5–10 экспериментов при идентичных условиях (температуре газа и начальных размерах капель).

Результаты экспериментального исследования

На Рис. 2 представлены зависимости время паффинга/микровзрыва каплей воды/керосина (τ_p) от температуры газа (T_g) (a — $R_{d0} = 1$ мм, объемное содержание воды 10 %) и начальных радиусов каплей (R_{d0}) (b — $T_g = 573$ К, объемное содержание воды 10 %) при эксперименте (синяя сплошная кривая) и при моделировании, предполагающей, что паффинг/микровзрыв начинается, когда температура на границе раздела вода/керосин ста-

новится равной температуре нуклеации воды (зеленая пунктирная кривая). Получено удовлетворительное (в пределах доверительного интервала) согласие результатов экспериментов и прогнозируемых времен задержек микро-взрывного распада в диапазоне температур газа (473–573 К) и начальных размеров каплей (0.5–0.6 мм). С увеличением температуры газа и начальных размеров каплей рассогласование между теорией и экспериментом увеличивалось, что связано главным образом со смещением водяного ядра относительно центра в экспериментах. Подробно влияние данного эффекта обсуждалось в [4].

Для регистрации средней температуры воды в каплях вода/керосин при нагреве до распада использован метод Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF). Для реализации метода PLIF использованы: высокоскоростная видеокамера, макрообъектив, светофильтр для нейтрализации избыточно-

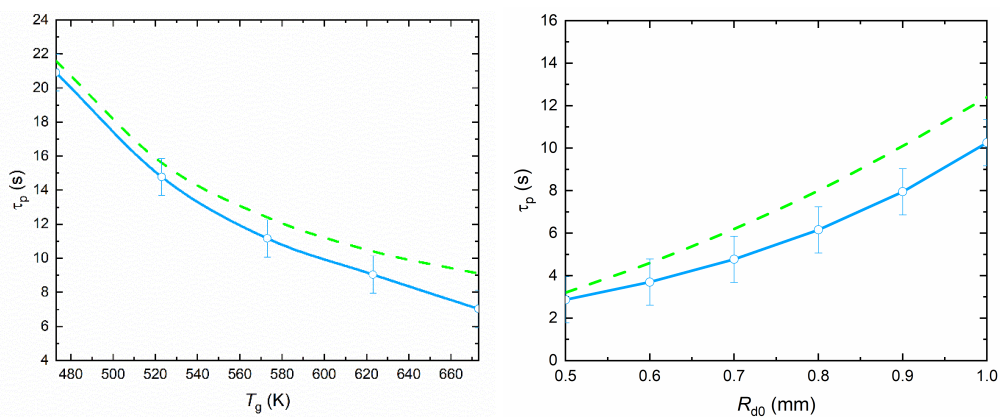


Рис. 2. Время до паффинга/микровзрыва каплей воды/керосина (τ_p) в зависимости от температуры газа (T_g): ((a) — $R_{d0} = 1$ мм, объемное содержание воды 10 %) и начального радиуса каплей (R_{d0}) ((b) — $T_g = 573$ К, объемное содержание воды 10 %), наблюдаемое экспериментально (синяя сплошная кривая) и предсказанное моделью, предполагающей, что вспучивание/микровзрыв начинается, когда температура на границе раздела вода/керосин становится равной температуре зародышеобразования воды (зеленая пунктирная кривая)

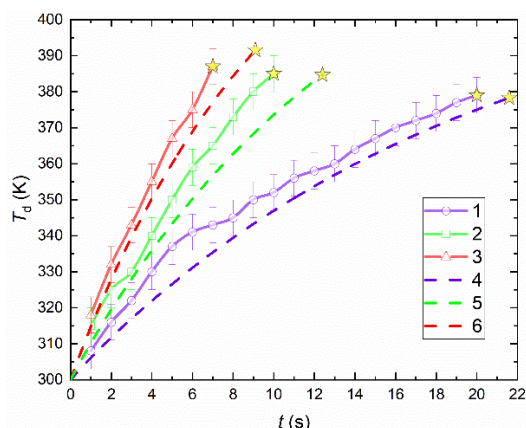


Рис. 3. Результаты экспериментальных измерений средней температуры воды в составе капель вода/керосин ($R_{d0} = 1$ мм, объемная доля воды 10 об. %) при $T_{gas} = 473$ К (1), 573 К (2) and 673 К (3) (сплошные линии) и результаты моделирования при $T_{gas} = 473$ К (4), 573 К (5) and 673 К (6) (пунктирные линии)

го лазерного излучения, флуоресцентный краситель Rhodamine B, непрерывный лазер, коллиматор для формирования лазерного ножа с варьируемым углом раскрытия, персональный компьютер с ПО Davis. В процессе проведения эксперимента капли вода/керосин рассекались по оси симметрии (через центр масс) лучом непрерывного лазера. Полученные видеокadres с изображением капля вода/керосин регистрировались высокоскоростной видеокамерой и обрабатывались с применением ПО Davis. Толщина лазерного ножа составляла 0.05 мм. Обеспечивалась минимальная постоянная плотность лазерного излучения в измерительной области. При больших значениях тол-

щины лазерного ножа последний мог оказывать существенное влияние на характеристики прогрева капли. Измерения проводились не менее чем для 20–30 значений температур газов в диапазоне от 473 К до 673 К с целью получения калибровочной кривой при удовлетворительной точности. На Рис. 3 приведены результаты экспериментальных измерений средней температуры воды в составе капля вода/керосин при $T_{gas} = 473$ К, 573 К and 673 К (сплошные кривые) и результаты моделирования (пунктирные кривые). Получено удовлетворительное согласования результатов моделирования и эксперимента по изменению средней температуры водяного ядра во времени, отклонения не превышают 5 %. Причинами отклонения результатов моделирования от экспериментов являются: сдвиг водяного ядра относительно центра в экспериментах, наличие дополнительного подвода тепла за счёт лазерной подсветки, наличие примесей в виде твердых частичек и газовых пузырьков, выступающих в роли готовых центров парообразования.

Список литературы

- [1] Antonov D.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions // *Int. J. Therm. Sci.* 2019. V. 142. P. 30–41.
- [2] Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Rybdylova O., Sazhin S.S. Micro-explosion and autoignition of composite fuel/water droplets // *Combust. Flame.* 2019. V. 210. P. 479–489.
- [3] Antonov D.V., Nyashina G.S., Strizhak P.A., Romanov D.S. Micro-explosive droplet fragmentation of environmentally promising coal-water slurries containing petrochemicals // *Fuel.* 2021. V. 283. No. 118949.
- [4] Castanet G., Antonov D.V., Strizhak P.A., Sazhin S.S. Effects of water subdroplet location on the start of puffing/micro-explosion in composite fuel-water droplets // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2022. V. 186. No. 122466.